

平成 2 8 年 5 月 2 日現在

機関番号：3 4 4 1 9

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013 ~ 2015

課題番号：2 5 4 2 0 2 3 1

研究課題名 (和文) 脚式ロボットによる環境保全型農業の実践

研究課題名 (英文) Development of Legged Robot for the Shaft Tillage Cultivation

研究代表者

樹野 淳也 (TATSUNO, Junya)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：4 0 2 9 7 5 9 4

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,900,000 円

研究成果の概要 (和文) : 先行研究にて提案した環境保全型農業である局所耕うん栽培を実践する車輪型ロボットの開発に取り組んだところ、新たな移動機構として脚型ロボットの適用性を見いだした。そこで、本研究では、局所耕うん栽培を実践する実スケールの脚式農作業ロボットの開発に取り組んだ。具体的には、脚機構およびロボット本体の設計・試作、自己位置認識システムの精度確認実験、ロボットに搭載するチェーンポット苗定植用作業機の性能評価と改良などの研究項目を実施した。

研究成果の概要 (英文) : We proposed the shaft tillage cultivation for autonomous robot. Under this cultivation, deep vertical shaft is drilled by rotating the tillage tool, after that, seedling is transplanted to the shaft and grows until harvest time. We have discussed the possibility of application of legged locomotion to our robot. In this research we started to develop the legged robot to practice the shaft tillage cultivation. At first, we made prototype of the leg structure and the robot body. Second, we proposed an affordable and high-precision 2-D positioning method for the legged robot. As a result of the experiment to evaluate the measurement error, the RMSE was found to be about 15 mm. In addition, we experimentally investigated the transplanting performance of the transplanting equipment for chain pot seedlings. Although most seedlings were successfully transplanted into the shafts, we recognized some problem to be solved in future.

研究分野：計測制御工学

キーワード：農作業ロボット 脚式移動機構 ポジショニング 環境保全型農業

1. 研究開始当初の背景

環境保全型農業の実現に対し、情報技術・自動化技術を駆使し、環境負荷軽減と生産収益性の維持を同時に目指す精密農業のアプローチがある。また、労働不足の背景もあり、農業機械のロボット化は注目され、世界的に研究がすすめられている。しかし、これらの研究は人間が行ってきた運転作業の代行を担うもので、「ロボットならでは」の観点からの研究はほとんどない。一方、申請者らは、次世代の農業を目指しロボット化農業を研している。具体的には、ロボットが農業を行うことを前提に、環境保全型の栽培方法（局所耕うん栽培法）を提案し、それを具現化するロボットの開発を行ってきた。

先行研究において、車輪式移動機構でロボットを開発し、誘導実験を行った結果、移動機構を再考に至り、脚式移動機構の適用性を、次のように見出した。

1) 脚式移動機構の大きなデメリットの一つに移動速度の遅さがあるが、人間が操作しないロボットによる農作業には速度を必要としない。

2) 局所耕うん栽培での耕うん・移植は鉛直方向の作業であり、機体の進行を停止させることから、脚式移動機構による一歩ずつの進行と局所耕うん栽培の親和性が高い。

3) 局所耕うん栽培での耕うん・移植位置と脚の接地位置はともに点（座標）で管理できることから、例えば、歩行のために脚が接地した場所をすぐに耕うん（破壊）するような運用が考えられ、踏圧の問題も回避できる。

これらの利点を見いだしたことから、脚式移動機構の開発に着手した。図1は、そのアイデアイメージである。

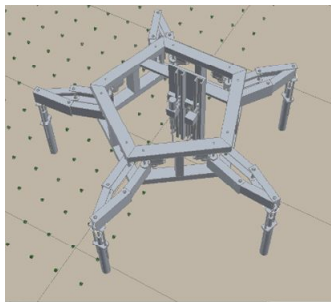


図1 脚式ロボットの設計イメージ

2. 研究の目的

先行研究での成果をふまえて、本研究では実スケールモデルの製作に着手した。我々の最終目標は、実スケールモデルの脚式ロボットによる局所耕うん栽培の実践であるが、本申請の目標は、圃場内で脚式ロボットを自律的に移動させ、苗を植え付けることとする。この目標のために、

- ・ 脚機構の設計・試作
- ・ ロボットの設計・試作
- ・ 自己位置認識システムの開発
- ・ 作業機の改良

などのシステム開発に関する研究を行うこ

とが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 脚機構およびロボットの設計・試作

スケールモデルの試作を行った先行研究により、脚の基本的なメカニズムは、GDAの考え方をもとに、遊脚および立脚をそれぞれパラレルリンク機構、直動機構とする構想を描いていた。この構想をもとに、実スケールの脚の設計および試作を実施した。なお、設計の要求仕様は次の通りとした。

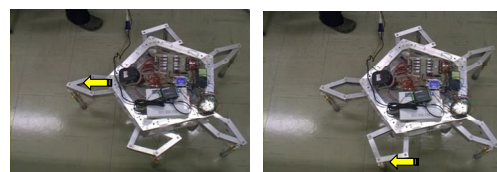
[立脚時] 最大 500 N (=50 kgf) の荷重がかかると仮定し、その時、脚を 10 mm/s で上昇させる

[遊脚時] 根元リンクを 0.24 (rad/s) で回転させる

また、胴体部については正五角形とし、内部に作業機が搭載可能のように中空構造とする。胴体の寸法は、既開発した作業機のサイズを考慮し、直径約 1000mm の円が外接するサイズとする。また、搭載する作業機との干渉を避けるために、胴体上面がフラットになるよう、上下のプレートで構成するラダー構造とし、脚の動力伝達機構をプレート間に納めるよう設計する。

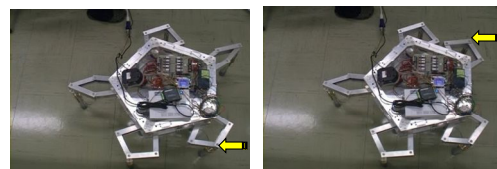
(2) 自己位置認識システムの開発

本研究で開発するロボットは、移動の速さよりは停止時の安定性を求めるため、歩容は1脚ごとのウェーブ歩容で良いと判断している。図2は、試作中の1/2.5モデルの脚式ロボットが歩行をしている様子である。このような歩容では、胴体部はほとんど停止しており、車輪式の移動とは大きく異なる特性を持つこととなる。換言すると、車輪式で培われてきた位置推定方法を直接応用するのではなく、この特性を利用した新たな位置推定方法があると考えられ、新たな方法を提案した。



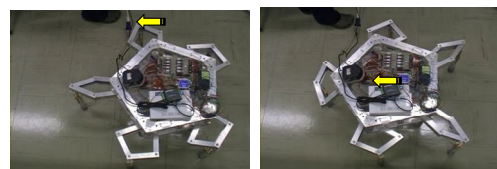
(1) Swing Leg1

(2) Swing Leg2



(3) Swing Leg3

(4) Swing Leg4



(5) Swing Leg5

(6) Body Movement

図2 模型による歩行の様子

(3) 作業機の改良

先行研究でチェーンポット苗定植用作業機(図3)を試作したが、その性能評価やロボット搭載の準備が課題であった。そこで、植付性能の評価を行うとともに、信号授受について検討を行った。



図3 試作したチェーンポット苗定植用作業機

4. 研究成果

(1) 脚機構およびロボットの設計・試作

図4は、試作した脚機構およびロボット全体の外観である。当初の構想を満足するロボットとなっている。



(a) 脚機構 (b) ロボット全体

図4 実スケールの試作ロボット

5つの脚に3つのアクチュエータを搭載すると、ロボット全体では合計15のアクチュエータが必要となる。加えて、設計・試作した脚機構は、GDAの考え方をもとに立脚と遊脚に機構を分散しているが、水平面内における足接地位置を決定する遊脚には高い位置精度が求められる。そのため、バックラッシの影響の少ない機構が望まれるが、ハーモニックドライブギアのような市販品を導入すると、更なるコスト増になってしまう問題もあった。そこで、低コストのバックラッシレスサーボ機構の開発を行った。



図5 ローコストなサーボ機構

一方、アクチュエータ数の問題についても検討を行った。1脚について3つのアクチュエータを使用している設計に対し、1つのアクチュエータでの動作を可能にするアイデアである。これは、我々が開発するロボットに高速での移動速度を必要としない特性を活かしたものであり、現在、知財化について検討している。

(2) 自己位置認識システムの開発

図6は、提案したアイデアをもとに構築した自己位置認識装置である。レーザ距離計には、測定精度が5mmのSick社製DME3000を用い、雲台として、Directed Perception社製パンチルトユニット(PTU-D46)を用いる。なお、このユニットの分解能は 0.0514285° である。この装置の精度を確認する実験を行った。

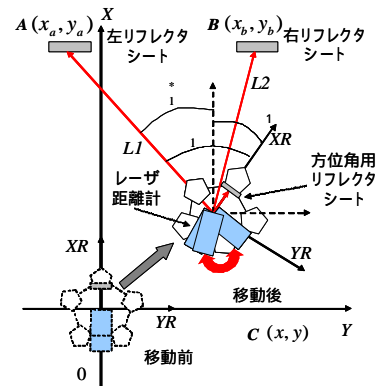


図6 自己位置認識の概略

移動台車に自己位置認識装置を取り付け、走行・停止を繰り返し、停止時に自己位置の測定を行った。なお、精度評価のために、精度3mmのトータルステーション(TS)で車両の位置と方位を併せて測定した。図7は、提案している方式により測定された軌跡とTSによる軌跡である。各測定点における二つの差をRMSEで算出すると、 $12 \pm 4\text{mm}$ 、 $0.331 \pm 0.135^\circ$ であった。目標としていた10mmの精度に僅かに及ばなかったが、パンチルトユニットの分解能の改善により精度が向上することを確認した。

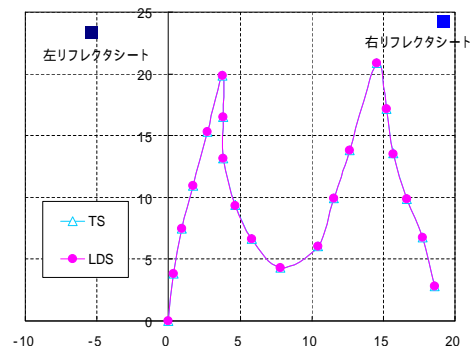


図7 実験結果

(3) 作業機の改良

先行研究にて、耕うんツールで空けられた縦穴に、紙筒のついたペーパーポット苗を人の手で置き入れる定植方法での栽培試験を報告しているほか、開発したセル成型苗定植用作業機について植付性能の確認を行っているが、本作業機では、性能を確認した定植プロセスとは異なるものとなっていたことから、本作業機の植付性能を確認するための実験を行った。なお、手押し台車に作業機を搭載し、圃場を250 mmごと移動させ、1列に40株ずつ4列で160株の植え付けをした。その結果、植付性能は約84% (160株中134株) となった。植付け動作を行えなかった原因は、いずれも苗に起因するものであった。例えば、倍土の充填が十分でなく、裸苗の質量が小さく、定植用カップへの投入時に予定の軌道から外れ、定植のサイクルを完了できない場合があった。また、耕うんから定植までの一連のサイクルは実行できたものの、欠株(出芽していない)の苗があった。現在の機構では、苗が欠株であるか否かの判断を自動的に行うことができないため、今後解消すべき課題であると認識した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

平岡信武, 稲垣克彦, 受動車輪を用いた省自由度型脚車輪ロボットの動作計画, 査読無, 東海大学紀要 情報理工学部, Vol.15, pp.15-19, (2016)

中村太郎, 大隅久, 辻俊明, 横田祥, 橋本卓弥, 稲垣克彦, 長谷川泰久, 新たなイノベーションを創造するシステムインテグレーションについて, 査読無, 計測自動制御学会論文集 52(3), 93-93, (2016)

木口量夫, 山本元司, 公文誠, 稲垣克彦, 諸岡健一, 林喜章, 渡邊哲陽, ヒューマンセントリック・システムインテグレーションについて, 査読無, 計測自動制御学会論文集 50(1), 1-1, (2014)

Noe Velazquez Lopez, Kiyoshi Tajima, Hideyuki Tanaka, Do Tuan Thanh, Wataru Yukumoto, Masataka Jitsuno, Masayoshi Kato, Eiichiro Sakaguchi, Junya Tatsuno and Tadashi Ishii, Guidance of a Transplanting Skid Steer Vehicle with Variable Center of Gravity, International Journal of Environmental and Rural Development, 査読有, Vol.4, No.1, pp.75-80, (2013)

〔学会発表〕(計14件)

田島淳, 砂川光, 江上親宏, 樹野淳也, 中山間地域営農支援運搬システムの開発, 農作業学会春季大会 2016年3月24日, 宮城大学(宮城県・仙台市)

Nobutake Hiraoka, Katsuhiko Inagaki, A Study of a New Controller Interface for

Omnidirectional Robots", 10th Asian Control Conference 2015, 2015年5月30日, コタキナバル(マレーシア)

花村健, 花村幸次朗, 樹野淳也, 高効率での接ぎ木が可能な接ぎ木ロボットの開発, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 2015年5月18日, 京都市勤業館(京都府京都市)

實野雅太, 田島淳, 加藤雅義, 砂川光, 樹野淳也, 局所耕うん器具を用いた耕うん同時評価法に関する研究 - 複数の細管による土壌のモデル化について -, 農作業学会春季大会, 2015年3月19日, 千葉大学(千葉県・柏市)

田島淳, 加藤雅義, 砂川光, 樹野淳也, 中山間地域における運搬システムにおいて電気軽トラックが果たす役割, 農作業学会春季大会, 2015年3月19日, 千葉大学(千葉県・柏市)

Nobutake HIRAOKA, Katsuhiko INAGAKI, A Comparative of Conventional Controllers for Omnidirectional Robots, MJIT-JUC Joint Intl. Symp., 2014年11月12日, クアラルンプール(マレーシア)

Nurul Izzati binti Azlizan, Katsuhiko INAGAKI, Development of Electronic Gadgets for Educational Purpose in the field of Robotics and Mechatronics, MJIT-JUC Joint Intl. Symp., 2014年11月12日, クアラルンプール(マレーシア)

Nurul Izzati binti Azlizan, Katsuhiko INAGAKI, Mobility of a Leg-wheeled Robot with Reduced DOF on Designated Terrains using Skating Motion by Passive Wheels, 2014 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Biomimetics, 2014年10月6日, バリ(インドネシア)

田島淳, 加藤雅義, 森谷美紀, 井出章, 樹野淳也, 中山間地域における運搬動力の省エネルギー化について, 農作業学会春季大会, 2014年5月15日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)

實野雅太, 田島淳, 加藤雅義, 砂川光, 樹野淳也, 局所耕うん器具を用いた耕うん同時評価法に関する研究 - 含水率が通気性指数に及ぼす影響について -, 農作業学会春季大会, 2014年5月15日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)

ヌルル イザティ ビンティ アズリザン, 稲垣克彦, 省自由度設計を導入した閉リンク型車輪ロボットの開発, 第14回システムインテグレーション部門講演会, 2013年12月18日, 神戸国際会議場(兵庫県・神戸市)

中野誠史, LOPEZ Noe Velazquez, 田中秀幸, THANH Do Tuan, 田島淳, 加藤雅義, 石井忠司, 樹野淳也, 重心が横移動するスキッドステア車両の旋回シミュレーション

ョン, 農業機械学会関東支部年次大会,
2013 年 8 月 9 日,東京農工大学(東京都・
府中市)

Katsuhiko Inagaki, Nurul Izzati Binti
Azlizan, Shaking motion by a leg
wheeled robot with passive wheels, The
2013 IEEE/ASME International
Conference on Advanced Intelligent
Mechatronics, 2013 年 7 月 10 日,(ウー
ロンゴン・オーストラリア)

實野雅太, 田島淳, 加藤雅義, 坂口栄一
郎, 樹野淳也, 局所耕うん栽培法におけ
る縦穴の効果, 日本沙漠学会第 24 回学
術大会, 2013 年 5 月 25 日, 広島大学(広
島県・東広島市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樹野 淳也 (TATSUNO, Junya)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号: 40297594

(2) 研究分担者

稲垣 克彦 (INAGAKI, Katsuhiko)

東海大学・情報理工学部・教授

研究者番号: 90276775

田島 淳 (TAJIMA, Kiyoshi)

東京農業大学・地域環境科学部・教授

研究者番号: 30188239